ارزیابی مقاومت شیارافتادگی مخلوط‌های آسفالتی گرم با مصالح سنگی درشت‌دانه*

«یادداشت پژوهشی»

منصور فخری[۱] نادر محمودی نیا[۲]

چکیده شیارافتادگی روسازی‌های آسفالتی با افزایش تردد وسایل نقلیه سنگین به ویژه در ناحیه‌های گرمسیر، مشکلات زیادی ایجاد می‌کند. مخلوط‌های آسفالتی گرم با مصالح سنگی درشت (Large Stone Asphalt Mix (LSAM)) نسبت به مخلوط‌های معمول(سنتی)، سختی، مقاومت برشی و در نتیجه در برابر شیارافتادگی، مقاومت بیشتری دارند. بنابراین استفاده از این مخلوط‌ها در لایه‌های ضخیم روسازی‌های آسفالتی ناحیه‌های گرم می‌تواند به عنوان یک گزینه مناسب طرح اختلاط، درنظر گرفته شود. مخلوط آسفالتی با مصالح سنگی درشت، مخلوطی است که بیشترین اندازه اسمی مصالح سنگی آن ۶۳ – ۲۵ میلیمتر باشد. برای طرح اختلاط این مخلوط‌ها روش اصلاح‌شده طرح اختلاط مارشال، بنابه استاندارد ASTM-D5581 به کار می‌رود. در این پژوهش آزمایشگاهی تلاش شده که مقاومت شیارافتادگی مخلوط‌های آسفالتی با مصالح سنگی درشت مورد ارزیابی قرار بگیرد و با مخلوط‌های آسفالتی معمول مقایسه شود. برای این هدف، چهار گونه مخلوط آسفالتی گرم با مصالح سنگی درشت با دانه‌بندی‌های متفاوت و یک گونه مخلوط آسفالتی معمول، طراحی شد. سپس نمونه‌های شیارافتادگی برای هر یک از مخلوط‌های آسفالتی با مصالح سنگی درشت با چهار مقدار متفاوت قیر و نیز برای مخلوط معمول با مقدار قیر بهینه تهیه شدند و با استفاده از دستگاه شیارافتادگی ویل‌تراک با ۱۲۰۰۰ سیکل رفت و برگشتی چرخ بارگذاری و در دمای ۶۰ درجه سانتیگراد مقدار عمق شیارافتادگی آن‌ها تعیین گردید. داده‌های حاصل از آزمایش‌های طرح اختلاط و شیارافتادگی با کمک نرم‌افزار SPSS Ver.11.5 تحلیل شدند و به این ترتیب، اثر عامل‌های گوناگونی مانند درصد قیر، درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی و گونه دانه‌بندی بر روی مقاومت شیارافتادگی مخلوط‌های آسفالتی گرم با مصالح سنگی درشت، مورد بررسی قرار گرفت. در پایان نیز برای تخمین مقدار عمق شیارافتادگی مخلوط‌های آسفالتی گرم با مصالح سنگی درشت، یک الگوی ریاضی ارایه شد.

واژه‌های کلیدی مخلوط آسفالتی با مصالح سنگی درشت، دانه‌بندی، طرح اختلاط مارشال، شیارافتادگی، ویل‌تراک، تراکم غلتکی

Rutting Resistance Evaluation of Large Stone Asphalt Mixtures

M. Fakhri N. Mahmoodinia

Abstract *Rutting of hot mix asphalt pavements due to increased number of heavy vehicles, especially in tropical regions, causes several performance problems. Large Stone Asphalt mixtures have more stiffness and shear resistance and so more rutting resistance compared to conventional mixtures. Hence, using these mixtures in thick layers of hot mix asphalt pavements at tropical regions could be an appropriate option for asphalt mix design. Large Stone Asphalt Mix (LSAM) is a mixture with the nominal maximum aggregate size between 25 and 63 mm. Modified Marshall mix design method according to ASTM-D5581 is used to design these mixtures. In this laboratory research, the rutting resistance of LSAM mixtures is evaluated and compared to conventional HMA mixtures. Large Stone Asphalt mixtures were designed with four different aggregate gradations as well as a conventional dense graded mixture. Rutting test specimens prepared at four different asphalt contents for Large Stone Asphalt mixtures and at optimum asphalt content for the conventional mixture. The rut depth of specimens at 60°C determined using Hamburg wheel tracking device after 12000 loading cycles. The data obtained from mix design and rutting tests analyzed using SPSS statistic software and the effects of various parameters such as asphalt content, air voids of compacted asphalt mixture and gradation on the rutting resistance of Large Stone Asphalt mixtures were evaluated. At the end, a mathematical model presented for predicting the rut depth of Large Stone Asphalt mixtures.*

Key Words Large Stone Asphalt Mixture, Gradation, Marshall Mix Design, Rutting, Wheel Track, Rolling Compaction

---

* نسخه‌ی اول مقاله در تاریخ ۸۶/۵/۱۹ و نسخه‌ی نهایی آن در تاریخ ۸۸/۲/۲۰ به دفتر نشریه رسیده است.

(۱) نویسنده‌ی مسئول، استادیار دانشکده مهندسی عمران ، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

(۲) کارشناس ارشد مهندسی راه و ترابری ، دانشگاه صنعتی خواجه نصیرالدین طوسی

مقدمه

با افزایش روزافزون رفت و آمد خودروهای تجاری به ویژه در ناحیه‌های گرمسیر و با توجه به فشار زیاد چرخ این وسایل نقلیه، شیارافتادگی روسازی‌های آسفالتی افزایش یافته است و نیاز به طراحی مخلوط‌های آسفالتی با استخوان‌بندی سنگدانه‌ای قویتر و مقاومت بیشتر در برابر این گونه خرابی‌های آسفالتی احساس می‌شود. برای بررسی سازوکار شیارافتادگی و نیز ارزیابی قابلیت این گونه خرابی‌های مخلوط‌های آسفالتی پژوهش‌هایی با روش آزمایش‌های بنیادین مخلوط‌های آسفالتی از جمله آزمایش‌های برشی و خزشی و همچنین آزمایش‌های شبیه‌سازی خرابی شیارافتادگی، با دستگاه چرخ بارگذاری جرجیا، دستگاه ویل‌تراک هامبورگ و دستگاه تحلیل روسازی آسفالتی (Asphalt Pavement Analyzer) در سال‌های گذشته صورت گرفته است. این پژوهش‌ها نشان می‌دهد که کاربرد مخلوط‌های آسفالتی با مصالح سنگی درشت باعث افزایش سختی، مقاومت برشی و در نتیجه مقاومت شیارافتادگی روسازی‌ها می‌شود [2]. مخلوط آسفالتی با مصالح سنگی درشت مخلوطی است که بیشترین اندازه اسمی مصالح سنگی آن ٦٣–٢٥ میلیمتر باشد. کاربرد این گونه مخلوط آسفالتی در لایه‌های اساس و آستر باعث مقاومت بیشتر روسازی در برابر تغییرشکل‌های ماندگار خواهد شد [1]. این گونه مخلوط آسفالتی به دلیل کاهش سطح مخصوص مصالح سنگی با افزایش بیشترین اندازه اسمی مصالح سنگی، نسبت به مخلوط‌های معمول با بیشترین اندازه اسمی کمتر از ٢٥ میلیمتر قیر بهینه کمتری دارد [2]. از برتری‌های مخلوط‌های آسفالتی با مصالح سنگی درشت ظرفیت سازه‌ای بیشتر و هزینه‌های کمتر می‌باشد[3]. پژوهشگران به این نتیجه رسیده‌اند که لایه‌های روسازی با مخلوط‌های آسفالتی با سنگدانه‌های بزرگتر از یک اینچ، در بارهای برشی تغییرشکل کمتری داشته‌اند و در مقایسه با نمونه‌های مغزه‌گیری شده از روسازی‌های با مخلوط‌های آسفالتی با بیشترین اندازه اسمی ١٩ میلیمتر سخت‌تر بوده‌اند[4]. مخلوط آسفالتی با مصالح سنگی درشت، مقدار VMA کمتری نسبت به مخلوط‌های معمول دارد که نشان‌دهنده حجم بیشتر مصالح سنگی در مخلوط، نسبت به مخلوط‌های معمولی می‌باشد که عاملی مؤثر در افزایش مقاومت شیارافتادگی است[5]. مقاومت فشاری محدود نشده مخلوط آسفالتی با مصالح سنگی درشت در مقایسه با مخلوط‌های معمولی، ٢ تا ٣ برابر افزایش می‌یابد و مقدار خزش نیز تا حد زیادی کاهش می‌یابد. همچنین، ضریب برجهندگی و مقاومت خستگی مخلوط‌های آسفالتی با مصالح سنگی درشت در مقایسه با مخلوط‌های معمولی بیشتر است[6]. اگر طرح مخلوط‌های آسفالتی با مصالح سنگی درشت، درست انجام شود، در برابر بارهای برشی و سوراخ کننده زیاد، مقاومت خوبی دارند و این می‌رساند که چنین مخلوط‌هایی در برابر تنش‌های زیاد ناشی از کامیون‌های سنگین با چرخ‌های تکی، مقاومت خوبی دارند[7]. در کشور ایران طراحی مخلوط‌های آسفالتی با استفاده از روش طرح اختلاط مارشال بنا به استاندارد ASTM-D1559 صورت می‌گیرد، ولی در طرح اختلاط این گونه مخلوط آسفالتی از روش اصلاح‌شده مارشال برابر با استانداردASTM-D5581 و به کارگیری قالب‌های ٦ اینچی، چکش مارشال ١٠ پوندی و تعداد ١١٢ ضربه تراکم استفاده می‌شود. این پژوهش به ارزیابی مقاومت مخلوط‌های آسفالتی با مصالح سنگی درشت در برابر شیارافتادگی و همچنین بررسی اثر عامل‌های مختلف مانند درصد قیر، درصد فضای خالی مخلوط‌های آسفالتی و گونه دانه‌بندی با استفاده از دستگاه آزمایش ویل‌تراک می‌پردازد.

مصالح آزمایش شده

با توجه به گستردگی استفاده از قیر ٦٠/٧٠ در بیشتر پروژه‌های راه‌سازی به ویژه در ناحیه‌های گرمسیر، قیر ٦٠/٧٠ پالایشگاه اصفهان برای ساخت نمونه‌های آزمایشی مخلوط‌های آسفالتی مورد استفاده قرار گرفت.

آزمایش‌های قیر براساس روش‌های درج شده در استاندارد AASHTO انجام پذیرفت که نتیجه‌های آن در جدول (۱) ارایه شده اند.

مصالح سنگی مورد استفاده در این پژوهش از نوع مصالح سنگ کوهی شکسته شده بود که از شرکت موکام واقع در شهرستان بومهن تهیه شد. نتیجه‌های آزمایش‌های انجام گرفته روی مصالح سنگی در جدول (۲) ارایه شده است. برای مخلوط آسفالتی معمول، دانه‌بندی شماره٤ نشریه ۱۰۱ سازمان برنامه و بودجه که قابل استفاده برای لایه‌های آستر و رویه می‌باشد و برای مخلوط‌های آسفالتی با مصالح سنگی درشت، دانه‌بندی ارایه شده در گزارش MSP92-02D برای این گونه مخلوط‌ها که ویژه لایه آستر بوده و در جدول (۳) آورده شده است، مورد استفاده قرار گرفت [10]. در جدول (٤) دانه‌بندی مخلوط‌های آسفالتی مورد آزمایش نشان داده شده است. برای دستیابی به هدف‌های طرح پژوهشی، محدوده دانه‌بندی مخلوط آسفالتی با مصالح سنگی درشت در چهار حد متفاوت مورد ارزیابی قرار گرفت. به این صورت که منحنی بالا، منحنی پایین و دو منحنی میانی برای تعریف دانه‌بندی مخلوط‌های آسفالتی با مصالح سنگی درشت به کار رفت تا اثر تغییر دانه‌بندی در محدوده مجاز بررسی شود. طرح اختلاط مخلوط آسفالتی معمول با استفاده از روش طرح اختلاط مارشال برابر با استاندارد ASTM-D1559 و با رعایت معیارهای ارایه شده در این استاندارد برای رفت و آمد سنگین صورت گرفت و طرح اختلاط مخلوط‌های آسفالتی گرم با مصالح سنگی درشت با روش طرح اختلاط اصلاح‌شده مارشال برای مخلوط‌های درشت‌دانه برابر با استاندارد-ASTM D5581 و با رعایت ضابطه‌های ارایه شده برای رفت و آمد سنگین صورت گرفت و مقدار قیر بهینه مخلوط‌های آسفالتی تعیین شد. شایان توجه است که در روش طرح اختلاط اصلاح‌شده مارشال از قالب‌های با قطر و ارتفاع به ترتیب ٦ و ۳/۷۵ اینچ و چکش مارشال ۲۲/۵ پوندی و ۱۱۲ ضربه تراکم استفاده می‌شود [9]. منحنی‌های طرح اختلاط مارشال مخلوط آسفالتی معمول و مخلوط‌های آسفالتی با مصالح سنگی درشت در شکل‌های (۱) و (۲) ارایه شده است. مقدار قیر بهینه مخلوط‌های مختلف با توجه به منحنی‌های مارشال و براساس دستورکار نشریهMS-2 انستیتو آسفالت و توصیه‌های درج‌شده در نشریه شماره ۲۳٤ سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی و با درنظر گرفتن سایر ویژگی‌ها تعیین شد. شکل (۲) نشان می‌دهد که با افزایش مقدار مصالح سنگی درشت در دانه‌بندی مخلوط‌های آسفالتی با مصالح سنگی درشت، استحکام مارشال و روانی این مخلوط‌ها به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد. در جدول (٥) نیز نسبت‌های حجمی طرح اختلاط در مقدار قیر بهینه، برای همه مخلوط‌های آزمایشی نشان داده شده است. همانطور که آشکار است درصد قیر بهینه مخلوط‌های آسفالتی گرم با مصالح سنگی درشت حدود ۲۰ درصد کمتر از مخلوط معمول می‌باشد. همچنین، استقامت و روانی نمونه‌های مارشال ٦ اینچی مخلوط‌های آسفالتی با مصالح سنگی درشت، نسبت به نمونه‌های مارشال ٤ اینچی مخلوط آسفالتی معمول به ترتیب در محدوده ۲/۰۵- ۱/۵ و ۱/٦۲- ۱/٤۸ قرار دارد که به عددهای ۲/۲۵ و ۱/۵ که به صورت نظری و بر اساس برابری کارمایه تراکم نمونه‌های ٤ و ٦ اینچی به دست می‌آید، نزدیک است [1].

جدول ۱ نتیجه‌های آزمایش‌های قیر مصرفی

گونه آزمایش	نتیجه آزمایش	روش استاندارد AASHTO
وزن مخصوص	۱/۰۱۷۳	T228
درجه نفوذ، دهم میلیمتر	۷۰	T49
نقطه نرمی، درجه سانتی گراد	٤۷/۸	T53
قابلیت شکل پذیری، سانتی متر	بیش از ۱۰۰	T51
حلالیت در تتراکلرور کربن، ٪	۹۸/۹	T44
نقطه اشتعال، درجه سانتی گراد	۳۹۸	T48
افت وزنی در اثر حرارت، ٪	۰/۰۲	T179

جدول ۲ ویژگی‌های مصالح سنگی [11,۱۲]

نا م آزمایش	روش استاندارد	نتیجه آزمایش	محدوده قابل قبول
وزن مخصوص واقعی(مانده روی الک شماره٤	ASTM-C127	۲/٦۰۳	—
وزن مخصوص ظاهری(مانده روی الک شماره٤)	ASTM-C127	۲/٦۸۲	—
جذب آب(مانده روی الک شماره٤)، ٪	ASTM-C127	۱/۱۳	< ۲/٥
وزن مخصوص واقعی(رد شده از الک شماره٤)	ASTM-C128	۲/٥۷۰	—
وزن مخصوص ظاهری(رد شده از الک شماره٤)	ASTM-C128	۲/۷۳٦	—
جذب آب(رد شده از الک شماره٤)، ٪	ASTM-C128	۲/۳٦	< ۲/۸
وزن مخصوص فیلر، گرم بر سانتیمترمکعب	ASTM-D854	۲/٦۷۸	—
سایش به روش لس آنجلس، ٪	AASHTO-T96	۱۸	< ٤۰
افت وزنی مقابل سولفات منیزیم(مانده روی الک شماره٤)، ٪	AASHTO-T104	۰/۳۱	< ۸
افت وزنی مقابل سولفات منیزیم(رد شده از الک شماره٤)، ٪	AASHTO-T104	۰/٦۱	< ۸
آزمایش تطویل، ٪	BS-812	۱۲/٥	< ۳۰
آزمایش تورق، ٪	BS-812	۱۹/۲	< ۳۰
درصد شکستگی در دو وجه، ٪	—	۹۷	۸۰>

جدول ۳ دانه‌بندی مصالح سنگی مخلوط آسفالتی با مصالح سنگی درشت براساس گزارش MSP92-02D [10]

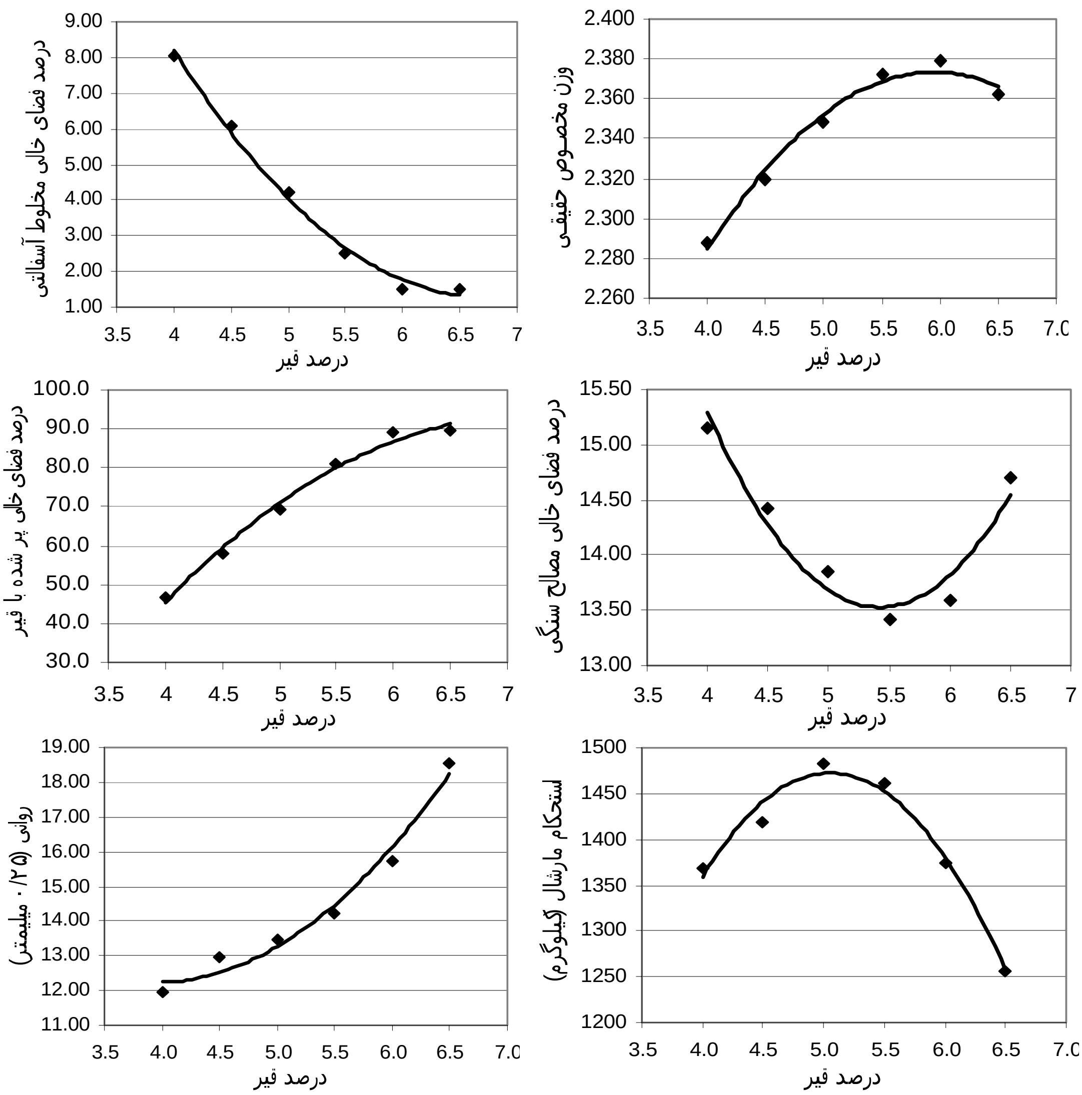
اندازه الک (میلیمتر)	۳۷/٥	۲٥	۱۹	۱۲/٥	۹/٥	٤/۷٥	۲/۳٦	۱/۱۸	۰/٦	۰/۳	۰/۱٥	۰/۰۷٥
درصد عبوری	۱۰۰	۷۰–۹۰	٥۸–۸۰	٤٤–۷۰	۳۸–٦۰	۲٤–٤٦	۱۸–۳۳	۱۲–۲٤	۷–۱٦	٤–۱۲	۳–۸	۲–۷

جدول٤ دانه‌بندی مخلوط‌های آسفالتی

الک	درصد عبوری				
	مخلوط معمولی	شماره۱ LSAM	شماره۲ LSAM	شماره۳ LSAM	شماره٤ LSAM
۳۷/٥	—	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰	۱۰۰
۲٥	—	۷۰	۷۷	۸۳	۹۰
۱۹	۱۰۰	٦۰	٦۷	۷۳	۸۰
۱۲/٥	۹٥	٤٥	٥۳	٦۱	۷۰
۹/٥	۸٤	٤۰	٤۷	٥۳	٦۰
شماره٤	٦۰	۲٥	۳۲	۳۹	٤٥
شماره۸	٤۳	۱۸	۲۳	۲۸	۳۳
شماره۳۰	—	۷	۱۰	۱۳	۱٦
شماره٥۰	۱٤	٤	۷	۱۰	۱۲
شماره۲۰۰	٦	۲	۳	٥	٦

جدول ۵ کمیت‌های مخلوط‌های آسفالتی مورد آزمایش در قیر بهینه

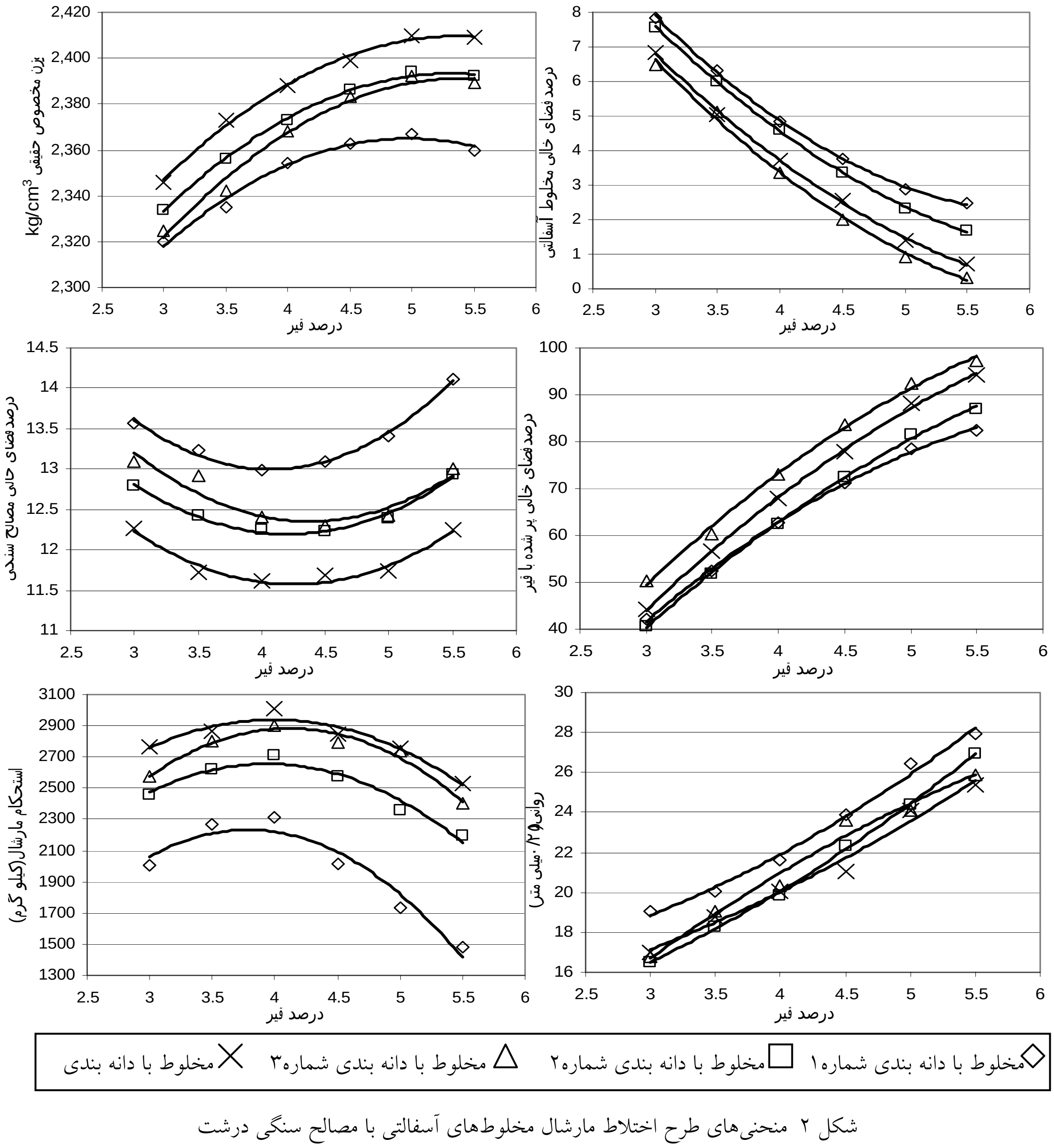
کمیت مخلوط آسفالتی	مخلوط معمولی	LSAM شماره۱	LSAM شماره۲	LSAM شماره۳	LSAM شماره٤
قیر بهینه(٪)	٥/۱	٤/۱	٤/۱	٤/۰	٤/۰
وزن مخصوص حقیقی	۲/۳٥۸	۲/۳٥۷	۲/۳۷٤	۲/۳٦۸	۲/۳۸۸
Va(٪)	۳/۸	٤/۷	٤/۳	۳/۳٥	۳/۷٤
VMA(٪)	۱۳/۷۰	۱۳/۰۲	۱۲/۲۰	۱۲/٤۰	۱۱/٦۲
VFA(٪)	۷۳	٦٥	٦٦	۷۳	٦۷/۸
استحکام(کیلوگرم نیرو)	۱٤۷۰	۲۲۰۰	۲٦۸۰	۲۸۹۹	۳۰۰۹
روانی (۰/۲٥میلیمتر)	۱۳/٦	۲۲	۲۰/۳	۲۰/۳۲	۲۰/۰۷
نسبت استقامت	—	۱/٥۰	۱/۸۲	۱/۹۷	۲/۰٥
نسبت روانی	—	۱/٦۲	۱/٤۹	۱/٥۰	۱/٤۸



شکل ۱ منحنی تغییرات کمیت‌های مخلوط آسفالتی معمول برحسب درصد قیر

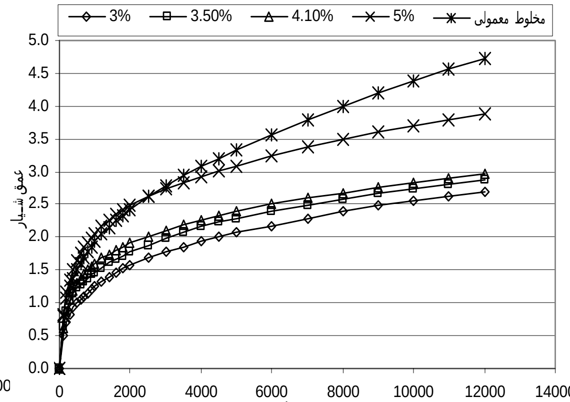
آزمایش‌های شیارافتادگی ویل‌تراک

آزمایش‌های شیارافتادگی با استفاده از دستگاه ویـل‌تـراک ماکروس گونه TR-332 سـاخت شـرکت ژاپنـی tanifuji انجام شد. این دستگاه برای بررسی تغییرات ویژگی‌هـای مخلوط‌های آسفالتی در دماهـای بـالا ماننـد مقاومـت در برابر شیارافتادگی، عریان‌شدگی و غیره در اثر بار رفـت و آمد و شرایط رطوبتی طراحی شده و در شرایط خشک و مرطوب می‌تواند به کار برود. در این آزمایش یک چـرخ لاستیکی با قطر و ارتفاع به ترتیب ۲۰ و ۵ سانتیمتر با بار ثابت از روی سطح نمونه‌ای کـه دمـای پیرامـونش ثابـت است، عبور داده می‌شود. ابعاد نمونه مورد استفاده در این دستگاه آزمایش ۱۵یا ۵ × ۳۰ × ۳۰ سانتیمتر، فشار چرخ بارگـذاری (kg/cm^2)۵/۵ و ٦/٤ و طـول مـسیر رفـت و برگـشتی چـرخ مـی‌توانـد ۲۲۸، ۲٦۰، ۲۸۰ و ۳۰۰ میلیمتـر باشد. در این پـژوهش، آزمـایش‌هـای شـیارافتادگی روی نمونه‌های به ابعاد ۵ × ۳۰ × ۳۰ سانتیمتر بـا سـرعت ۲۲ بـار رفـت و برگـشت در دقیقـه و بـا فـشار چـرخ (kg/cm^2)۵/۵ در شـرایط خـشک و دمـای ٦۰ درجـه سانتیگراد صورت گرفت.

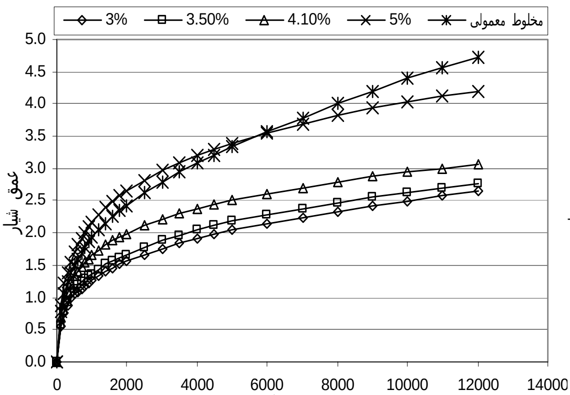


شکل ۲ منحنی‌های طرح اختلاط مارشال مخلوط‌های آسفالتی با مصالح سنگی درشت

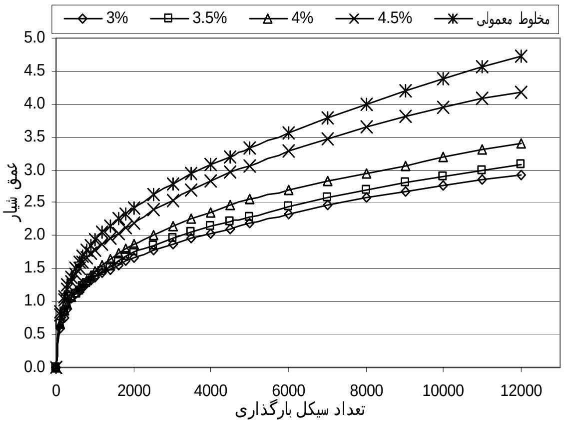
در تهیه نمونه‌های آزمایش شیارافتادگی از دستگاه تراکم غلتکی ماکروس گونه TR-323M استفاده شد. در این دستگاه، غلتک تراکم دارای شعاع ٤٦٠ میلیمتر، طول قوس ٥٦٠ میلیمتر و وزن همراه با اهرم ۲۲۰ کیلوگرم می‌باشد. بار غلتیدن نیز با توجه به طول اهرم(۱۲٥٦-۰ میلیمتر) بین ۱۱۰۰-۰ کیلوگرم متغیر است. در تراکم نمونه‌های آزمایش شیارافتادگی ویل‌تراک، طول اهرم برابر ۸۰۰ میلیمتر انتخاب شد که بار غلتیدن برابر با ۷۰۰ کیلوگرم را وارد می‌کند. در تهیه نمونه شیارافتادگی مخلوط آسفالتی معمول با استفاده از تجربیات پیشین، زمان تراکم با ۸۰ بار رفت و برگشت غلتک صورت پذیرفت. برای تعیین زمان مناسب تراکم مخلوط‌های آسفالتی با مصالح سنگی درشت، دو نمونه مخلوط درشت‌دانه با دانه‌بندی شماره ۲ و قیر ٤٪ و با تعداد ۱۰۰ و۱۲۰ رفت و برگشت غلتک ساخته شد. سپس نمونه‌ها برش داده شده و وزن مخصوص حقیقی آن‌ها تعیین شد. از مقایسه وزن مخصوص حقیقی این نمونه‌ها و نمونه‌های مارشال با قیر ٤٪ ، تعداد۱۱۰ بار رفت و برگشت غلتک برای زمان تراکم غلتکی انتخاب شد. از هر گونه مخلوط با مصالح سنگی درشت با چهار درصد متفاوت قیر، نمونه‌هایی ساخته شدند و همراه با نمونه شیارافتادگی مخلوط آسفالتی معمول در ۱۲۰۰۰ سیکل رفت و برگشت چرخ بارگذاری در آزمایش شیارافتادگی قرار گرفتند. نتیجه‌های آزمایش‌های شیارافتادگی مخلوط‌های با مصالح سنگی درشت با درصد قیرهای مختلف به همراه شیارافتادگی مخلوط آسفالتی معمول با قیر بهینه در شکل‌های (۳) تا (٦) نشان داده شده است. برای بررسی اثر مقدار درصد قیر و اختلاف آن نسبت به درصد قیر بهینه، مخلوط‌هایی با مصالح سنگی درشت با پنج مقدار مختلف قیر، مورد آزمایش قرار گرفتند. به این صورت که این نمونه‌ها با مقدار قیر بهینه و مقدارهای قیر با اختلاف ۰/٥ و ۱/۰ درصد نسبت به قیر بهینه تهیه شد. این شکل‌ها نشان داد که مقدار شیارافتادگی مخلوط‌های آسفالتی گرم با افزایش مقدار قیر مخلوط افزایش می‌یابد. در شکل (۷) نیز شیارافتادگی مخلوط‌های مورد آزمایش در درصد قیر بهینه با یکدیگر مقایسه شده‌اند. همان‌گونه که از شکل مشخص است، مخلوط‌های آسفالتی با مصالح سنگی درشت، نسبت به مخلوط آسفالتی معمول، مقدار شیارافتادگی کمتری دارند. همچنین در مخلوط‌های با مصالح سنگی درشت با افزایش مقدار مصالح درشت مقاومت در برابر شیارافتادگی افزایش می‌یابد. در جدول (٦) و شکل (۸) مقدارهای عمق شیارافتادگی مخلوط‌های مختلف درشت‌دانه در مقایسه با درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی نشان داده شده است. شکل (۸) نشان می‌دهد که با افزایش درصد قیر و کاهش درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی از ٤٪ ، مقدار شیارافتادگی مخلوط‌های آسفالتی با مصالح سنگی درشت با شدت بیشتری افزایش می‌یابد.



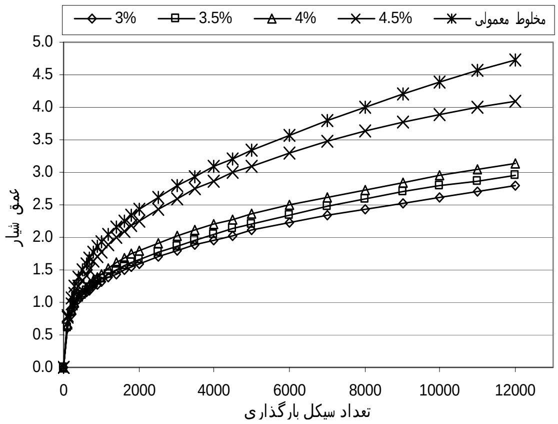
شکل ۳ مقدارهای عمق شیار مخلوط شماره ۱



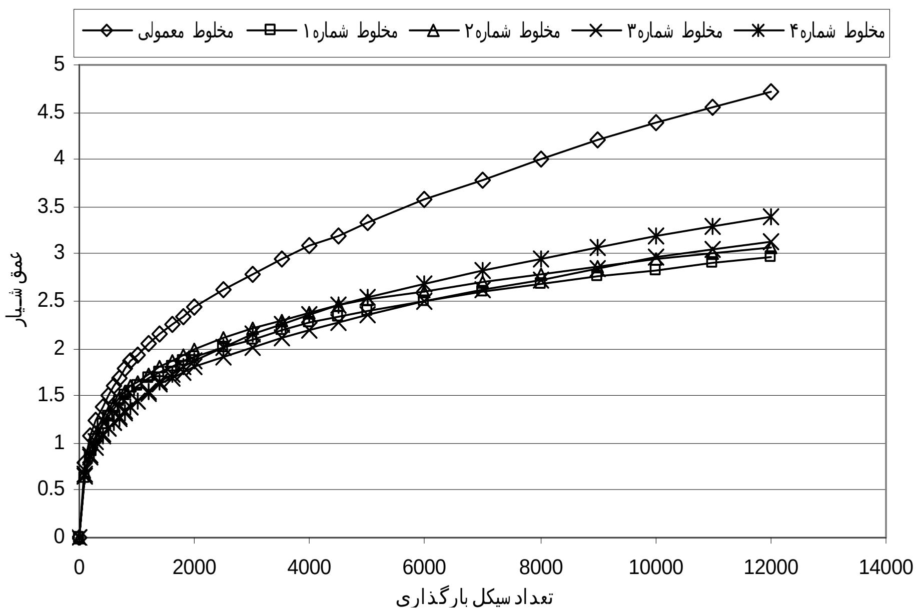
شکل ٤ مقدارهای عمق شیار مخلوط شماره۲



شکل ۶ مقدارهای عمق شیار مخلوط شماره۴



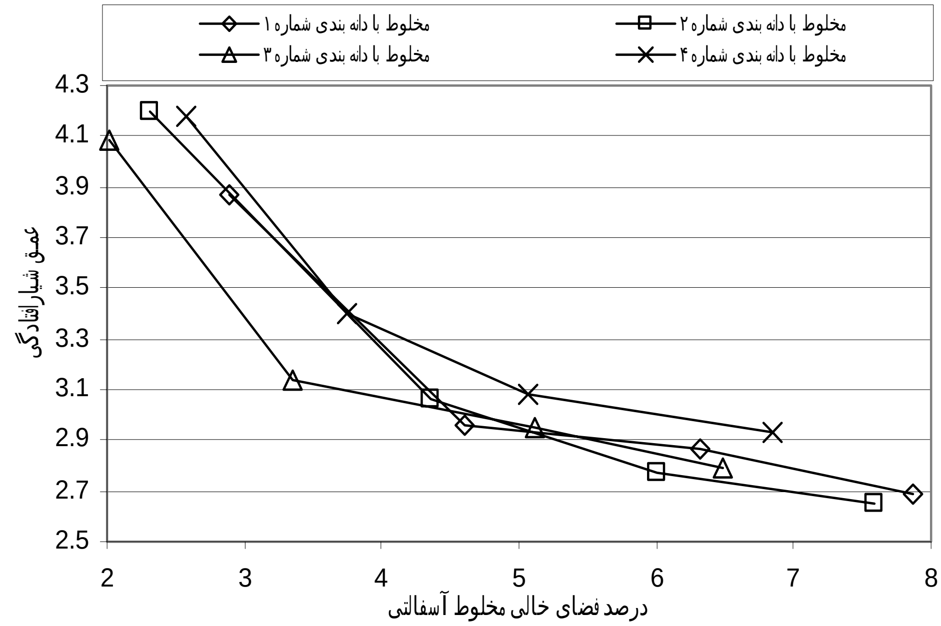
شکل ۵ مقدارهای عمق شیار مخلوط شماره ۳



شکل ۷ مقایسه شیارافتادگی مخلوط‌های مختلف در درصد قیر بهینه

جدول ۶ عمق شیارافتادگی مخلوط‌های درشت‌دانه با مقدارهای مختلف قیر و درصد فضای خالی متفاوت

	LSAM شماره۱				LSAM شماره۲				LSAM شماره۳				LSAM شماره۴			
درصد قیر (٪)	۳	۳/۵	۴/۱	۵	۳	۳/۵	۴/۱	۵	۳	۳/۵	۴	۴/۵	۳	۳/۵	۴	۴/۵
Va (٪)	۷/۸۶	۶/۳۲	۴/۶۱	۲/۸۹	۷/۵۸	۶/۰	۴/۳۵	۲/۳۱	۶/۴۹	۵/۱۱	۳/۳۵	۲/۰۲	۶/۸۵	۵/۵۶	۳/۷۴	۲/۵۷
عمق شیار(میلیمتر)	۲/۶۹	۲/۸۷	۲/۹۶	۳/۸۷	۲/۶۵	۲/۷۷	۳/۰۶	۴/۲	۲/۷۹	۲/۹۵	۳/۱۴	۴/۰۸	۲/۹۳	۳/۰۸	۳/۴	۴/۱۸



شکل ۸ مقدارهای عمق شیارافتادگی در مقایسه با درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی

تحلیل داده‌های آزمایش

آزمایش‌های صورت گرفته بر روی مخلوط‌های آسفالتی، بخش مهم و اساسی این پژوهش هستند. ولی آزمایش به تنهایی و بدون نتیجه‌گیری آماری به خودی خود ارزشمند نیست. زیرا هدف از کار پژوهشی و آزمایشگاهی در حقیقت آن است که اگر آزمایش‌ها در شرایط مشابه بر روی نمونه‌های جدیدی که وضعیت یکسان با نمونه‌های مورد استفاده در این پژوهش از نظر مصالح سنگی، قیر، چگونگی ساخت نمونه‌ها و شیوه انجام آزمایش‌ها داشته باشند، صورت گیرد، نتیجه‌های مشابهی حاصل شود. در واقع انجام یک پژوهش آماری و استنباط استقرائی در پایان آزمایش‌های انجام شده امری ضروری است. بنابراین، برای عامل‌های فیزیکی- مکانیکی مخلوط‌هایی با مصالح سنگی درشت به عنوان متغیرهای مستقل و مقدار عمق شیارافتادگی به عنوان متغیر وابسته، تحلیل آماری و الگوسازی ریاضی صورت گرفت. با توجه به این‌که در این تحقیق، ساخت مخلوط‌های آسفالتی گرم با مصالح سنگی درشت و از چهار دانه‌بندی مصالح سنگی استفاده شده است. برای درنظرگرفتن اثر تغییرات دانه‌بندی در الگوسازی نهایی و با توجه به این‌که عددهای وابسته به گونه دانه‌بندی متغیرهای اسمی می‌باشند، عاملی به نام "عدد دانه‌بندی" که با نماد n مشخص شده است، تعریف شد، که از سوی دیگر وابسته به گونه دانه‌بندی بوده و از طرفی دیگر متغیر اسمی نیست. برای تعیین دانه‌بندی‌های مصالح سنگی با کمترین فضای خالی و بیشترین تراکم، رابطه (۱) که رابطه فولر نام دارد، به کار می‌رود.

$$P_i = 100\left(\frac{d_i}{D}\right)^n \quad (۱)$$

در این رابطه، D ، اندازه بزرگترین الک، d_i ، اندازه الک i ام و n ، ضریبی است که اگر بین ۰/۵- ۰/۴۵ انتخاب گردد، مصالح سنگی دارای بیشترین تراکم خواهد بود. با بررسی مقدارهای n مربوط به الک‌های مختلف در

دانه‌بندی‌های چهارگانه، مقدارهای مربوط به الک ۱ اینچ به عنوان عدد دانه‌بندی انتخاب شد. داده‌های مورد استفاده در تحلیل آماری در جدول (۷) نشان داده شده است. بررسی هیستوگرام و منحنی نرمال متغیرهای مختلف نشان داد که همه متغیرها تا حد قابل قبولی دارای توزیع نرمال هستند. ضریب‌های همبستگی بین این متغیرها که به صورت خروجی نرم افزار آماری spss می‌باشند، در جدول (۸) نشان داده شده است. با بررسی این ضریب‌ها، متغیرهای عدد دانه‌بندی، درصد قیر و درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی به عنوان متغیرهای مستقل انتخاب شدند. متغیرهای مستقل و وابسته مورد استفاده در ارایه الگو، همگی دارای علامت‌های مثبت هستند. همان‌گونه که در جدول (۸) مشخص است، متغیر وابسته عمق شیارافتادگی با هر سه متغیر مستقل عدد دانه‌بندی، درصد قیر و درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی همبستگی دارد، ولی ضریب همبستگی با متغیرهای درصد قیر و درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی بیشتر است. متغیرهای مستقل درصد قیر و درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی با یکدیگر دارای همبستگی قوی می‌باشند. بنابراین، در الگوسازی به هر دوی این متغیرها نیاز نیست، ولی، برای افزایش دقت الگوی ریاضی و با توجه به نتیجه‌های پژوهش‌های پیشین که بیان‌گر اثرگذاری بالای عامل‌های درصد قیر و درصد فضای خالی در مقاومت شیارافتادگی مخلوط آسفالتی هستند، از هردوی این متغیرهای مستقل، در الگوسازی بهره گرفته شد.

جدول ۷ داده‌های مورد استفاده در تحلیل آماری

ردیف	n	Pb	Gmb	Va	VMA	VFA	stability	R
۱	۰/۸۸۵	۳	۲/۳۱۳	۷/۸۶	۱۳/۵۷	۴۲/۱	۲۰۰۷	۲/۶۹
۲	۰/۸۸۵	۳/۵	۲/۳۳۵	۶/۳۲	۱۳/۲۴	۵۲/۳	۲۲۶۷	۲/۸۷
۳	۰/۸۸۵	۴/۱	۲/۳۵۶	۴/۶۱	۱۳	۶۴/۴	۲۳۰۰	۲/۹۶
۴	۰/۸۸۵	۵	۲/۳۶۷	۲/۸۹	۱۳/۴۱	۷۸/۴	۱۷۳۵	۳/۸۷
۵	۰/۶۴۸	۳	۲/۳۳۴	۷/۵۸	۱۲/۷۹	۴۰/۷	۲۴۵۷	۲/۶۵
۶	۰/۶۴۸	۳/۵	۲/۳۵۶	۶	۱۲/۴۲	۵۱/۷	۲۶۱۷	۲/۷۷
۷	۰/۶۴۸	۴/۱	۲/۳۷۶	۴/۳۵	۱۲/۲۴	۶۴/۴	۲۷۰۰	۳/۰۶
۸	۰/۶۴۸	۵	۲/۳۹۴	۲/۳۱	۱۲/۳۹	۸۱/۴	۲۳۵۶	۴/۲
۹	۰/۴۶۲	۳	۲/۳۲۵	۶/۴۹	۱۳/۰۹	۵۰/۴	۲۵۷۱	۲/۷۹
۱۰	۰/۴۶۲	۳/۵	۲/۳۴۲	۵/۱۱	۱۲/۹۱	۶۰/۴	۲۸۰۳	۲/۹۵
۱۱	۰/۴۶۲	۴	۲/۳۶۸	۳/۳۵	۱۲/۴	۷۳/۳	۲۸۹۹	۳/۱۴
۱۲	۰/۴۶۲	۴/۵	۲/۳۸۳	۲/۰۲	۱۲/۳	۸۳/۶	۲۷۸۹	۴/۰۸
۱۳	۰/۲۶۱	۳	۲/۳۴۶	۶/۸۵	۱۲/۲۷	۴۴/۲	۲۷۶۴	۲/۹۳
۱۴	۰/۲۶۱	۳/۵	۲/۳۷۳	۵/۰۶	۱۲/۷۲	۵۶/۸	۲۸۶۲	۳/۰۸
۱۵	۰/۲۶۱	۴	۲/۳۸۸	۳/۷۴	۱۱/۶۲	۶۷/۸	۳۰۰۷	۳/۴
۱۶	۰/۲۶۱	۴/۵	۲/۳۹۹	۲/۵۷	۱۱/۶۸	۷۸	۲۸۴۶	۴/۱۸

R مقدار عمق شیار، stability استحکام مارشال، VFA درصد فضای خالی پر شده با قیر، VMA درصد فضای خالی مصالح سنگی، Va درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی، Gmb وزن مخصوص حقیقی مخلوط متراکم، Pb درصد قیر و n عدد دانه بندی است.

جدول ۸ ضریب‌های همبستگی متغیرها

			R	n	Pb	Gmb	Va	VMA	VFA	stability
Spearman's rho	R	Correlation Coefficient	1.000	-.315	.880**	.899**	-.950**	-.512*	.943**	.344
		Sig. (2-tailed)	.	.234	.000	.000	.000	.043	.000	.192
		N	16	16	16	16	16	16	16	16
	n	Correlation Coefficient	-.315	1.000	.099	-.419	.182	.691**	-.103	-.885**
		Sig. (2-tailed)	.234	.	.716	.107	.500	.003	.704	.000
		N	16	16	16	16	16	16	16	16
	Pb	Correlation Coefficient	.880**	.099	1.000	.805**	-.940**	-.320	.947**	.024
		Sig. (2-tailed)	.000	.716	.	.000	.000	.226	.000	.930
		N	16	16	16	16	16	16	16	16
	Gmb	Correlation Coefficient	.899**	-.419	.805**	1.000	-.884**	-.759**	.824**	.503*
		Sig. (2-tailed)	.000	.107	.000	.	.000	.001	.000	.047
		N	16	16	16	16	16	16	16	16
	Va	Correlation Coefficient	-.950**	.182	-.940**	-.884**	1.000	.479	-.987**	-.303
		Sig. (2-tailed)	.000	.500	.000	.000	.	.060	.000	.254
		N	16	16	16	16	16	16	16	16
	VMA	Correlation Coefficient	-.512*	.691**	-.320	-.759**	.479	1.000	-.387	-.726**
		Sig. (2-tailed)	.043	.003	.226	.001	.060	.	.139	.001
		N	16	16	16	16	16	16	16	16
	VFA	Correlation Coefficient	.943**	-.103	.947**	.824**	-.987**	-.387	1.000	.228
		Sig. (2-tailed)	.000	.704	.000	.000	.000	.139	.	.395
		N	16	16	16	16	16	16	16	16
	stability	Correlation Coefficient	.344	-.885**	.024	.503*	-.303	-.726**	.228	1.000
		Sig. (2-tailed)	.192	.000	.930	.047	.254	.001	.395	.
		N	16	16	16	16	16	16	16	16

چندین الگوی غیرخطی مورد بررسی قرار گرفت. سرانجام، الگوی غیرخطی کرافت که شکل کلی آن به صورت رابطه (۲) می‌باشد، انتخاب شد.

$$R = a \, . \, n^{\alpha} . \, Pb^{\beta} \, . \, Va^{\gamma} \qquad (۲)$$

R : عمق شیارافتادگی

Va : درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی

Pb : درصد قیر

n : عدد دانه‌بندی

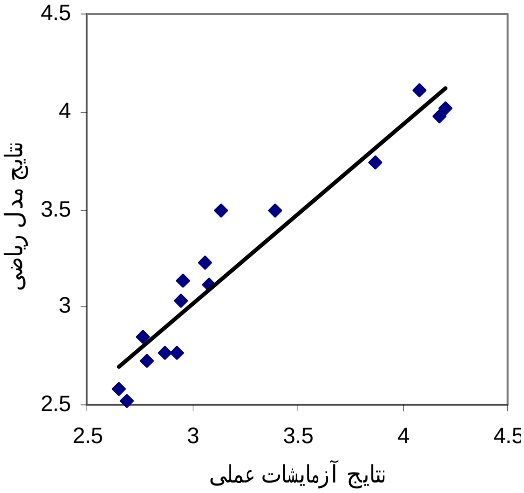
پس از انجام تحلیل رگرسیون (وایازش) چند متغیر غیرخطی، رابطه کرافت به صورت رابطه (۳) حاصل شد. ضریب همبستگی چندگانه برای این الگو برابر ۰/۹۵۶۲است.

$$R=۳/۱٤٤n^{-۰/۰۵۰۰۲۸۸}Pb^{۰/۲۷۳۷۱۲۲}Va^{-۰/۲۵۷۳۳۱۳} \qquad (۳)$$

حساسیت الگو نسبت به هر یک از متغیرها به صورت نرخ تغییرات مقدار خروجی($\frac{\Delta outp(x)}{outp(x)}$) الگو نسبت به نرخ تغییرات مقدار متغیر($\frac{\Delta x}{x}$) سنجیده شد.

$$Sensivity = \frac{\Delta outp(x)}{outp(x)} \times \frac{x}{\Delta x}$$

تغییرات مقدار خروجی الگو در برابر تغییر یک متغیر و ثابت نگاه‌داشتن سایر متغیرها سنجیده شده و این کار برای همه متغیرهای مستقل موجود در الگو تکرار شد. مهمترین موضوع در تفسیر نمودار حساسیت الگو و نتیجه‌های تحلیل حساسیت، مقدار حساسیت و شیب تغییرات آن است. نتیجه‌ها نشان می‌دهد که حساسیت الگوی مورد بحث نسبت به تغییر همه متغیرها تا حدودی ثابت بوده و نرخ تغییرات خروجی آن که عمق شیارافتادگی می‌باشد، با تغییر این متغیرها ثابت است. همچنین، حساسیت این الگوی ریاضی نسبت به تغییرات متغیر درصد قیر و فضای خالی مخلوط آسفالتی زیاد و نسبت به تغییرات متغیر عدد دانه‌بندی بسیار کم می‌باشد. در شکل (۹) مقدارهای عمق شیارافتادگی حاصل از آزمایش‌های عملی و همچنین نتیجه‌های حاصل از الگوی تعیین عمق شیارافتادگی با یکدیگر مقایسه شده است. بنا به شکل (۹)، نتیجه‌های آزمایش‌های عملی و نتیجه‌های الگوی ریاضی بر حسب یکدیگر با تقریب روی خطی با زاویه ٤۵ درجه قرار دارند و می‌توان نتیجه گرفت که الگویی ریاضی، درصد خطای کمی با نتیجه‌های آزمایش‌های عملی دارد.



شکل ۹ مقایسه نتیجه‌های آزمایش‌های عملی و نتیجه‌های حاصل از الگوی ریاضی تعیین عمق شیارافتادگی

نتیجه‌گیری

۱. منحنی‌های طرح اختلاط مارشال مخلوط‌های آسفالتی گرم با مصالح سنگی درشت نشان می‌دهند که با افزایش مصالح درشت در دانه‌بندی مخلوط‌های آسفالتی با مصالح سنگی درشت، استحکام مارشال و روانی این مخلوط‌ها به ترتیب کاهش و افزایش می‌یابد.

۲. درصد قیر بهینه مخلوط‌های آسفالتی گرم با مصالح سنگی درشت حدود ۲۰ درصد کمتر از مخلوط‌های آسفالتی معمول است.

۳. استقامت و روانی نمونه‌های مارشال ٦ اینچی مخلوط‌های آسفالتی گرم با مصالح سنگی درشت نسبت به نمونه‌های مارشال ٤ اینچی مخلوط آسفالتی معمول، به ترتیب در محدوده ۲/۰۵ –۱/۵ و ۱/٦۲– ۱/٤۸ قرار دارد.

٤. مقدار شیارافتادگی مخلوط‌های آسفالتی با افزایش مقدار قیر مخلوط افزایش می‌یابد.

۵. مخلوط‌های آسفالتی گرم با مصالح سنگی درشت نسبت به مخلوط‌های آسفالتی معمول مقاومت بیشتری در برابر شیارافتادگی دارند. همچنین در این مخلوط‌ها با افزایش مقدار مصالح درشت، مقاومت در برابر شیارافتادگی افزایش می‌یابد.

٦. با افزایش درصد قیر و کاهش درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی از ٤٪، عمق شیارافتادگی مخلوط‌های آسفالتی با مصالح سنگی درشت، با شدت بیشتری افزایش می‌یابد.

۷. مقدار مقاومت شیارافتادگی مخلوط‌های آسفالتی با مصالح سنگی درشت وابستگی زیادی به مقدار درصد قیر و درصد فضای خالی مخلوط آسفالتی دارد و با ضریب همبستگی کمتری به گونه دانه‌بندی وابسته است.

مراجع

1. Kandhal, P. S., "Large Stone Asphalt Mixes: Design and Construction", National Center for Asphalt Technology, Report No.90-4, (1990).
2. Fernando, E. G., Button, J. W., and Crockford, W., *"Rut Susceptibility of Large Stone Mixes"*, Transportation Research Board, (1997).
3. Merwe, V., and Hugo, F., *"Recommendation on mix design and related aspects of Heavy Duty Asphalt Pavements"*, Southern African Bitumen and Tar Association, (1989).
4. NAPA, *"Large Stone Mixes prove effective in areas subjected to concentrated loads"* Hot Mix Asphalt Technology, PP.22-33, (1988).

5. Davis, R. L., "Large Stone Mixes", Report IS-103, NAPA, Riverdale, (1988).
6. Abdulshafi, O., and Talbert, L., "Large Aggregate Asphalt Concrete Mixes for Use in lieu of ODOT Item301", FHWA/OH-93/013, Ohio Department of Transportation, (1992).
7. Accot, M., and Holt, D., *"Design end Performance Study of Heavy Duty Large Stone Hot Mix Asphalt under Concentrated Shear Conditions"*, IS-105, NAPA, Riverdale, Maryland, (1989).
8. ASTM Designation : D1559, "Standard Test Method for Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus", (1989).
9. ASTM Designation : D5581, "Standard Test Method for Resistance to Plastic Flow of Bituminous Mixtures Using Marshall Apparatus (6Inch-Diameter Specimen)", (1996).
10. "Large Stone Binder", Kentucky Department of Transportation, MSP-92-02D, (1999).
11. *"Mix Design Methods for Asphalt Concrete and Other Hot Mix Types"*, Asphalt Institute, Manual Series No.2, MS-2

۱۲. "مشخصات فنی عمومی راه"، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی ایران، نشریه شماره ۱۰۱، (۱۳۷۵).
۱۳. "آیین‌نامه روسازی آسفالتی راه‌های ایران"، سازمان مدیریت و برنامه‌ریزی ایران، نشریه شماره ۲۳٤، (۱۳۸۱).